

터빈 부품의 수명평가와 주요재료 특성

정 순 호

한국중공업(주) 기술연구소 전문연구원



●1950년생.
●터빈로터의 수명평가 실험기술의 개발 및 정밀측정 등에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

근대 산업혁명 이후 중공업의 발전과 함께 오랜 동안 가동되어 온 발전설비, 석유화학 설비 등은 이미 설계수명을 훨씬 넘어 30~40년간 사용되어 왔다. 또한 향후 10년간 설계수명을 초과하는 산업설비 주요 부품들의 수가 훨씬 증가할 것으로 예상되고 있다. 이러한 설비들의 지속적인 가동에는 상당한 경제적 이유가 있으며 이에 따른 기술적인 타당성의 입증도 요구된다.

전형적인 화력발전 설비의 수명연장에 필요한 비용이 새로운 발전소 건설비용의 20~30% 정도라는 보고⁽¹⁾도 있으며 이러한 설비의 소유주들은 자연히 발전소 건설보다 가동중인 설비의 수명연장에 더욱 큰 관심을 갖게 되었다. 따라서 안정성, 신뢰성 등의 확보를 위하여 주기적인 진단과 검사를 채택하게 되었다.

따라서 주요 설비의 현상태를 분석 평가하고 건전한 잔여수명을 예측할 수 있는 기술과 방법이 필요하게 되었으며 이러한 기술들은 다른 새로운 설비의 안정성, 신뢰성, 효율 등에 관한 복합적인 진단에도 매우 유용하게 될 것이다. 최근 고온에서 사용되는 설비들에 대한 수명평가 기술과 관련하여 연구와 기술개발 활동이 매우 활발하였으며 이러한 연구내용에는 재료특성, 경년열화, 수명평가에 관한 것들이 많다.

재료특성과 경년열화에 대하여는 주로 크립, 피로, 균열성장, 인성(toughness) 및 부식에 관한 연구들이 많았다. 본 해설에서는 발전설비중 터빈 로터의 수명평가의 한 방법과 이와 관련한 재료특성에 관하여 살펴본다.

2. 수명평가

고온 설비의 수명평가는 그 해석방법에 따라 조금씩 차이는 있으나 대체로 비슷하다. 여기서는 중심공 주위에 초기결함이 존재하며 균열 성장을 전제로 하는 터빈 로터의 수명평가 방법중 하나를 간략히 소개한다. 그 평가방법을 그림 1과 같이 나타낸다.

평가순서는 로터 중심공 주위에 있는 결함의 크기와 위치 등을 비파괴 검사법으로 검출하고 이것을 파괴역학적으로 평가하기 위하여 ASME code 방법에 따라 단순한 형상으로 치환한다. 첫단계로 선형탄성 파괴역학(LEFM : linear elastic fracture mechanics)을 기초로 안정성을 평가한다. 이것은 재료의 파괴인성 K_{Ic} 와 냉기 기동시의 최대응력으로 결함의 임계크기 (a_c)를 계산하고, 초기결함크기 (a_i)와 비교하여 안전계수에 준한 안전성을 분석한다. 터빈의 냉동기동시 운전 상태에 따른 임계결함 크기의 변화는 그림 2와 같다. 그 다음 터빈의 기동상태에 따른 응력상승폭, 재료의 균열성장률 특성 (da/dN)으로 초기 결함크기가 임계크

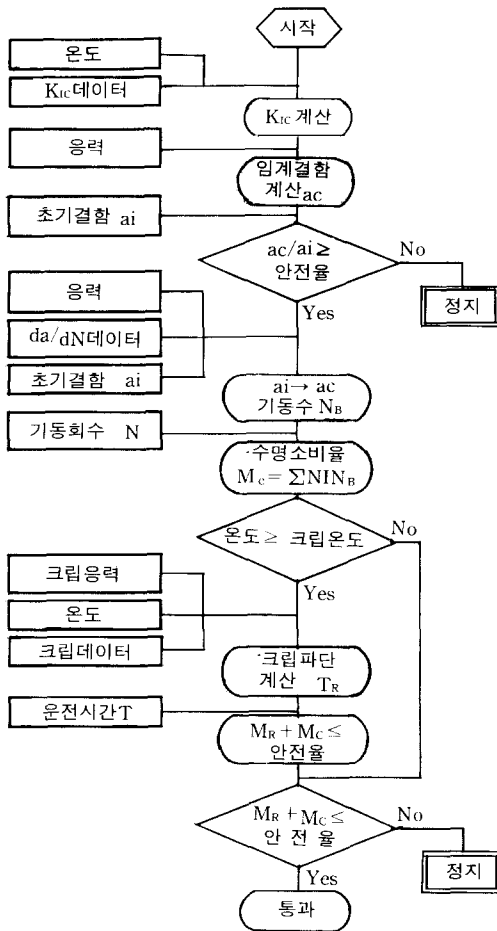


그림 1 터빈 로터의 수명평가 흐름도

기로 성장하는 기동반복 회수(N_B)를 계산하여 향후의 잔여 기동 회수를 추정하는 피로수명을 평가한다. 크립 수명평가는 정상운전 상태의 크립 응력, 로터의 온도 및 크립 파단 데이터를 이용하여 크립 파단시간(T_R)을 계산하고 운전 누적시간(T)과 비교한 후 마지막 단계로 피로수명과 크립 수명의 합(습)으로 로터 잔여 수명을 산출한다.

수명평가에서는 적용되는 여러 가지 수식의 특성과 안전계수에 따라 예측되는 수명의 차이가 있을 수 있으며, 생산공정과 제조기술에 따라 금속재료의 기계적 특성치, 온도 상승시 재료특성의 변화, 경년열화 등에 관한 각종 데이터의 적용에 따라 수명평가 차이가 나올 수도 있다. 그리고 로터에 발생하는 응력은 그림 3과 같이 대개 유한요소법(FEM)으로 계산하며 결함 예측부위나 주요 부분은 요소(mesh)를 세분하여 비교적 정밀한 해석이 되도록 한다.

이 때에 온도분포 및 응력해석용 컴퓨터 프로그램에 입력되는 재료의 탄성계수, 항복강도, 포와송비 등의 기계적 특성치와 열전달계수, 비열, 열팽창계수, 비중 등의 물리량 데이터에도 세심한 주의를 기울여야 하며 정확한 경계조건이 결정되어야 한다.

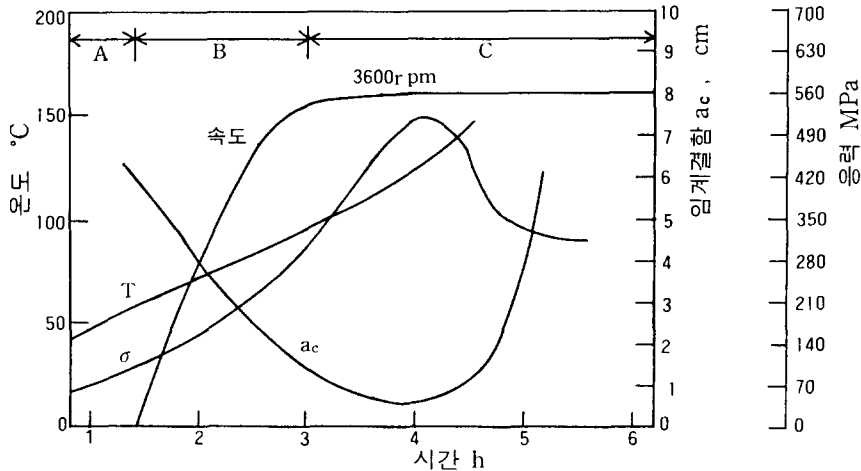


그림 2 터빈의 냉기 기동시 운전상태와 임계결함 크기의 관계⁽²⁾

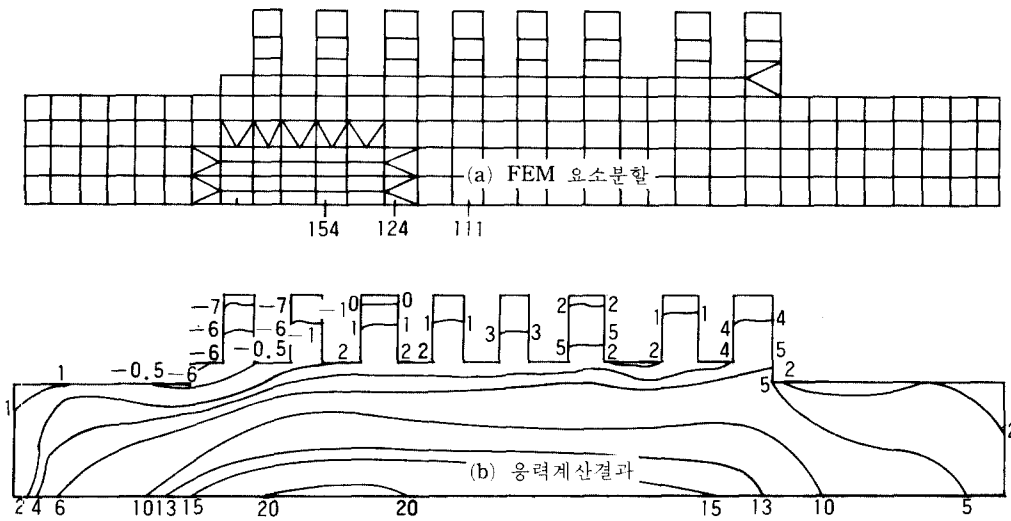


그림 3 로터의 FEM 요소분할과 응력계산 결과⁽³⁾

3. 재료특성

3.1 터빈 부품재료

발전용 증기 터빈은 보일러에서 발생하는 고온(538℃), 고압(168kgf/cm²)의 과열 증기에 노출되므로 항시 경년열화 상태에 놓이는 부품들로 구성되며 회전축인 로터, 회전날개(blades), 고정날개(vanes), 케이싱 및 볼트류가 주요부품이다. 이들은 니켈(Ni), 크롬(Cr), 몰리브덴(Mo), 바나듐(V) 등의 합금강이며 로터

류는 1Cr-1Mo-0.25V강을 많이 사용하며 초고온 로터, 볼트, 회전날개, 밸브스템 등은 12% Cr강으로 제조된다. 표 1은 화력발전 터빈용 재료의 특성과 합금상태를 보여준다.

저압로터(LP rotors)를 제외한 터빈 부품의 손상기구는 피로, 크립, 취성과피로 관계가 있으며 크립 영역 이하의 온도에서 가동되는 저압로터는 손상보다는 낮은 온도에서의 취성과피로와 더 큰 관계가 있다. 특히 저압로터의 마지막 단에서는 부식피로(corrosion fatigue)와 응력부식(stress corrosion)과 같은 저온부식현

표 1 화력발전 터빈용 재료⁽⁴⁾

품 명	주 요 특 성	사 용 재 료
고중압 로터	크립강도·내부식성·열피로 강도, 인성(toughness)	Cr-Mo-V강
저압로터, 디스크	인성, 내응력부식성, 피로강도	Ni-Cr-Mo-V강
고중압 브레이드	크립강도, 피로강도, 내부식성, 내산화성	12% Cr강
저압 브레이드	피로강도, 내부식피로 침식성	12% Cr강
내부 케이싱, 밸브 스템체스트	크립강도, 열피로 강도, 인성, 항복강도	Cr-Mo강

상이 나타난다.

다음절에서는 앞에서 설명한 로터의 수명평가에서 중요한 재료의 파괴인성, 피로균열 및 크립 특성에 관하여 설명한다.

3.2 파괴인성

인성(toughness)이라 함은 재료가 파손을 일으키는 동안이나 그 전에 소성변형을 하여 에너지를 흡수하는 능력을 일컬으며, 파괴역학이 발전하기 전에는 샤르피 브이노치 시편의 흡수에너지(absorbed energy)로 표현하였으며 이것은 공업적으로 현재까지 가장 많이 쓰이는 방법이다. 그림 4에 나타낸 바와 같이 흡수에너지는 온도에 따라 변화하며, 시편 파단면에 나타나는 취성 파괴면적과 연성 파괴면적의 비율도 변하며 온도상승에 따라 연성 파괴면적이 증가한다. 100% 취성파괴가 나타나는 구역을 lower-shelf라 하고 연성파괴만 나타나는 곳을 upper-shelf라 한다.⁽⁴⁾ 또 두 구역 사이를 천이구역(transition region)이라 하며 파괴면의 비율이 같은(취성파괴면=연성파괴면=50%) 온도를 천이온도(FATT; fracture appearance transition temperature)라 한다.

이와 같이 재료의 인성은 온도에 따라 상승하며 파괴역학적인 재료특성으로 표현되는 파

괴인성치(K_{IC})도 비슷한 변화를 한다.

샤르피 충격시험으로 재료 인성을 구하는 방법은 비교적 수월하며 많은 데이터가 확보되어 있으나 파괴인성치를 직접 실험으로 구하는 데는 많은 제약이 있으며 찾아볼 수 있는 실험 데이터도 한정되어 있다. 따라서 연구자들은 파괴인성치를 다른 재료 특성으로부터 환산하여 구하는 방법을 연구하여 발표하였다. Rolfe와 Novak⁽⁵⁾은 upper-shelf에서 샤르피 충격실험 데이터로부터 로터강의 파괴인성치를 계산하는 식 (1)을 제시하였다.

$$\left(\frac{K_{IC}}{\delta y}\right)^2 = 5 \left[\left(\frac{CVN}{\sigma_y}\right) - 0.05 \right] \quad (1)$$

여기서, K_{IC} 는 파괴인성치($k_{SI}\sqrt{in}$), σ_y 는 항복강도(k_{SI}), CVN은 upper-shelf에서의 흡수에너지(ft-lb)이다.

이외에 다른 연구자들에 의한 K_{IC} 는 관계식을 표 2에 열거한다.

또 Begley와 Logsdon⁽⁶⁾은 upper-shelf에서는 식 (1)을, lower-shelf 부근에서는 $K_{IC} = 0.5\sigma_y$ 의 관계로 터빈 로터강의 파괴인성치를 구하고 천이온도에서는 평균값을 계산하여 실험치와 비교한 결과 그림 5와 같이 일치한다고 하였다.

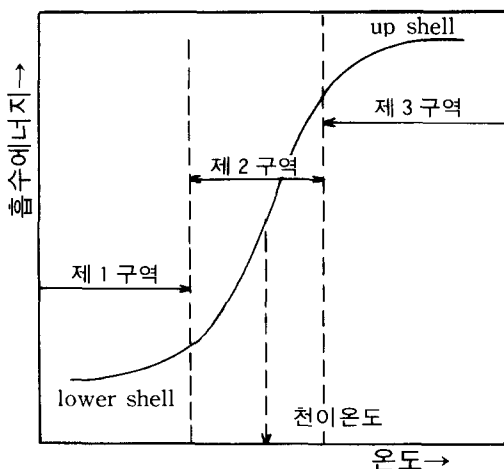


그림 4 샤르피 충격 흡수 에너지의 천이곡선

3.3 피로균열성장

균열의 성장과정은 반복응력을 계속 받으면서 초기균열(a_i)이 재료의 특성 또는 균열의 기하학적인 조건에 따라 크기가 증대되는 과정이다. 피로균열 성장에 대한 데이터는 일정하중 범위의 실험조건에서 균열을 가진 시편을 이용하여 얻게 되며 균열성장 특성을 표현하는 데는 선형탄성 파괴역학(LEFM) 개념이 가장 널리 쓰인다. 균열성장 특성은 대개 그림 6과 같이 피로균열 성장률의 대수값($\log da/dN$)과 응력확대계수 범위(stress intensity factor range: ΔK)의 대수값($\log \Delta K$)의 관계로 나타나는 것이 일반적이다.

그림 6의 제1구역에서는 쉽게 관측 가능한

표 2 파괴인성치 K_{Ic} 와 CVN의 관계식

관 계 식	비 고
천이구역에서	
Barsom-Rolfe : $\dots\dots\dots\sigma_y=269$ to 1696MPa	
$K_{Ic}^2/E=2(CVN)^{3/2}$ $\dots\dots\dots$ Static tests	
$K_{Ic}^2/E=5(PCVN)$ $\dots\dots\dots$ Precracked Charpy tests	
Corten-Sailors : $\dots\dots\dots$ CVN=7 to 70 J	
$K_{Ic}=15.5(CVN)^{1/2}$ or $K_{Ic}^2/E=8(CVN)$ $\dots\dots\dots$ Static tests	
$K_{Ia}=15.873(CVN)^{3/8}$ $\dots\dots\dots$ Dynamic (high-strain-rate) tests	
Marandet-Sanz : $\dots\dots\dots$ Static tests	
$K_{Ic}=20(CVN)^{1/2}$ $\dots\dots\dots T_{KIc}$ at $K_{Ic}=100\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$	
$T_{KIc}=16.2+1.37 T_{28}$ $\dots\dots\dots T_{28}$ at CVN=28J	
Begley-Logsdon :	
K_{Ic} at FATT= $^{1/2}(K_{Ic}$ from Rolfe-Novak relationship+0.5 σ_y) $\dots\dots\dots\sigma_y=269$ to 1696MPa	
Iwade-Watanabe-Tanaka :	
$K_{Ic}/K_{Ic.us}=0.0807+1.962\exp[0.0287(T-FATT)]$ $\dots\dots\dots$ For $-40^\circ\text{C} > (T-FATT)$	
$K_{Ic}/K_{Ic.us}=0.623+0.406\exp[-0.00286(T-FATT)]$ $\dots\dots\dots$ For $350^\circ\text{C} > (T-FATT) > -40^\circ\text{C}$	
UPPER-SHELF 에서	
Rolfe-Novak : $\dots\dots\dots\sigma_y=690$ to 1696MPa	
$(K_{Ic}/\sigma_y)^2=5[(CVN/\sigma_y)-0.05]$ $\dots\dots\dots$ Static tests	
Wullaert-Server : $\dots\dots\dots\sigma_y=345$ to 483MPa	
$K_{Ia}=20(DVN)^{1/2}$ $\dots\dots\dots$ Dynamic J-integral initiation	
$K_{Ic}=2.1(\sigma_y CVN)^{1/2}$ or $(K_{Ic}/\sigma_y)^2=4.41(CVN/\sigma_y)$ $\dots\dots\dots$ All loading rates with appropriate σ_y	
Lawrence Livermore Laboratory :	
$(K_{Ic}/E)^2=CVN(9.66+0.04\sigma_y)$ $\dots\dots\dots K_{Ic}=(EJ_{Ic})^{1/2}$; $K_{Ic}=(EJ_{Ia})^{1/2}$	
Ault :	
$(K_{Ic}/\sigma_y)^2=1.37(CVN/\sigma_y)-0.045$ $\dots\dots\dots$ High-strength, low-toughness steels	
Iwade-Karushi-Watanabe : $\dots\dots\dots$ Pressure-vessel steels	
$(K_{Ic}/\sigma_y)^2=0.6478(CVN/\sigma_y-0.0098)$	

균열성장은 없으며 임계응력 확대계수범위 (threshold SIF range : ΔK_{th})는 균열성장에 필요한 ΔK 의 하한 임계치를 나타내며 이보다 낮은 값에서는 균열성장이 없다. 로터강의 경우 ΔK_{th} 는 대략 $6\text{kg}/\text{m}^{3/2}$ 의 값을 갖는다. 직선부분으로 나타나는 제2구역은 $\log da/dN$ 과 $\log \Delta K$ 가 직선 비례관계를 가지며 이의 수식적인 표현노력이 많이 있었다.⁽⁷⁾ 제3구역에서의 균열성장률은 매우 빠르고 전체 피로수명에 비하여 아주 짧은 기간이며 임계균열크기에 도달하면 불안정 파괴를 일으킨다. 제2구역의 직선

비례식은 Paris의 식이 가장 널리 알려져 있으며 그 식은 다음과 같다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2)$$

여기서, C 는 재료와 응력상태에 따른 상수이며 m 은 직선의 기울기를 나타낸다. 피로균열 성장특성은 여러 가지 요인에 의한 영향을 받고 있으며 좀더 자세히 알아보면 다음과 같다.

(1) 응력비의 영향

균열에 작용하는 응력비(stress ratio : $R=$

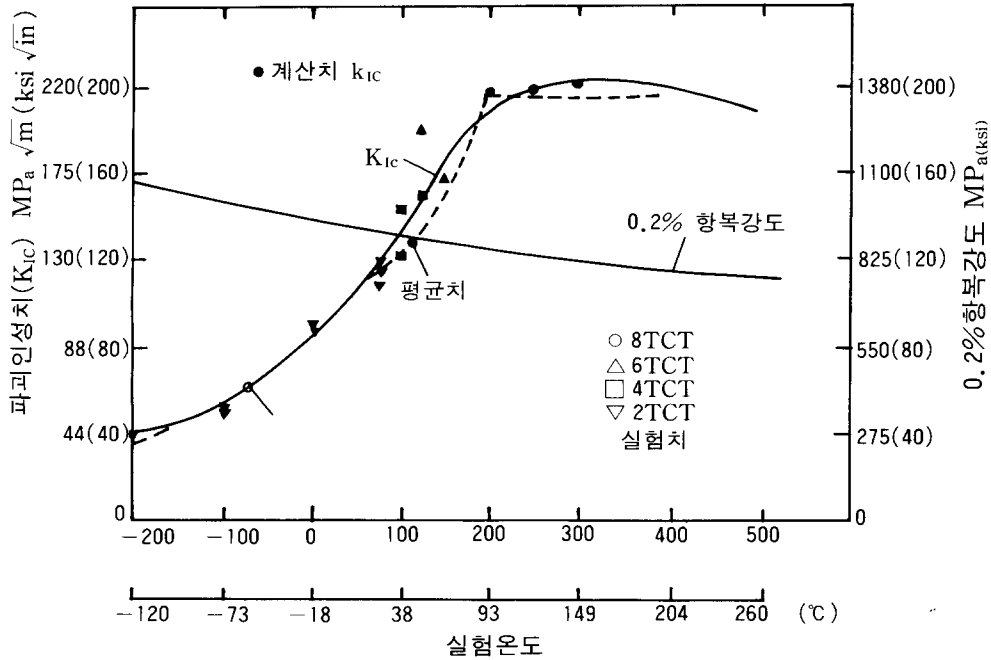


그림 5 로터강의 K_{Ic} 실험치와 계산치

$\sigma_{min}/\sigma_{max}$ 가 터지면 균열성장률이 높아지며 이런 현상은 전 구역에서 나타나지만 $R < 0$ 인 경우에는 영향이 거의 없다고 알려졌다.

(2) 하중 주파수의 영향

하중이 반복되는 속도의 영향은 하중 주파수가 낮은 경우(3Hz 이하)에 주로 나타나며 균열성장률이 약간 증가하게 된다. 이것은 낮은 주파수의 경우가 높은 주파수일 때보다 사이클 당 하중지속시간이 길어 변형과 균열 진전시간이 많아지기 때문이다.

(3) 온도의 영향

피로균열 성장률은 온도 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있으며 금속의 미세조직의 영향이 중요한 것으로 알려져 있다. 온도가 올라감에 따라 응력비, 주파수, 파형 및 크립 등의 영향이 증대되며 또 이들간의 상호작용으로 더욱 영향이 커진다. 또 고온에서는 산화, 부식이 활발해져 균열이 더욱 가속되기도 한다.

(4) 기타영향

인장시의 과부하는 균열성장을 지연시키는

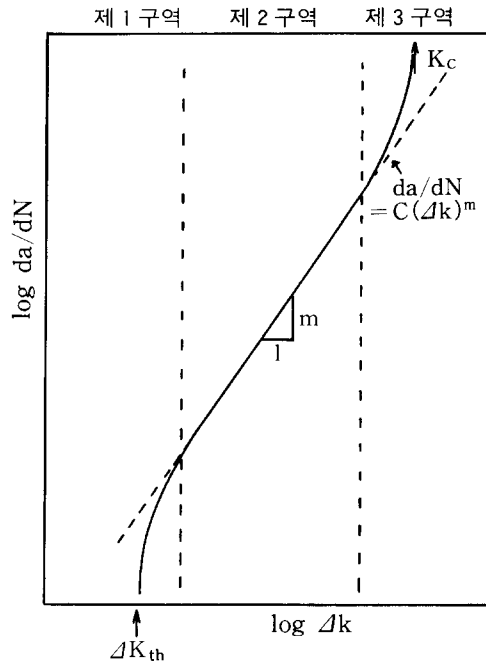


그림 6 피로균열 성장률과 응력확대계수 범위의 관계

효과도 있으며 이는 잔류응력과 균열부의 좌굴과 변형경화 등으로 생각된다. 이외에 균열표면의 기하학적 효과, 부식효과, 크립의 효과와 재료의 두께, 파형 등의 영향도 있다.

3.4 크립 (Creep)

일정한 하중의 작용하에서 일어나는 시간에 따른 연신(stress)을 크립하며 이는 시간이 경과하면서 재료의 변형과 파괴를 수반하게 된다. 크립은 금속학적인 전위(dislocation)현상으로 설명되고 있으며 고온에서 매우 중요한 재료특성이나 장시간의 실험시간이 소요되므로 신뢰성 있는 데이터를 얻은 것은 한정적이다. 발전소의 설비들은 장기간 사용되는 설비이므로 적어도 10만 시간 정도의 실험 데이터를 필요로 하지만 실제 10만 시간 정도의 실험은 불가능하므로 단기간 실험 데이터로부터 실가동 조건으로 데이터 외삽이 필요하게 된다. 또한 온도의 장시간 실험 데이터를 같은 재료의 다른 온도와 응력조건에 적용할 필요도 있게 된다. 대개는 1000~3000시간의 응력파단 실험(stress rupture test) 데이터로부터 실가동 상

태의 데이터로 환산하여 가동중인 로터의 잔여 수명을 예측하는 방법을 사용한다. 크립 데이터의 외삽법으로는 Larson-Miller 파라미터를 널리 이용한다. 이것은 시간과 온도를 그룹핑(grouping)한 형태로서 이 파라미터와 응력과 관계가 그림 7과 같이 이루어진다. Larson-Miller 파라미터는 다음과 같다.

$$\text{Larson-Miller 파라미터} = T(C + \log t) \quad (3)$$

여기서, T 는 온도(절대온도 단위), t 는 시간, C 는 상수이며 C 값은 재료에 따라 10~40이 적용되나 금속의 경우 $C=20$ 으로 적용한다.

4. 맺음말

발전용 터빈 부품중 회전체인 로터의 수명평가를 간단히 소개하고 수명평가지 고려되는 주요 재질특성에 대하여는 간단한 설명과 데이터를 이용하는 방법을 기술했다. 정확한 수명평가를 위해서는 금속학적인 고찰을 병행하여 경년열화와 효과를 고려하고, 실제 가동 조건과 동일시할 수 있는 각종 데이터를 적용해야 하나 본문에서와 같이 실험에 따르는 제약이 많아 추정 또는 가공된 데이터를 이용한다. 신뢰성 높은 수명평가를 위해선 각종 데이터 확보를 위한 실험장치의 개선과 실험방법의 개발이 매우 중요하다고 본다. 또한 현존하는 재료제조 기술상 초기부터 일정한 허용결함을 인정하면서 설계, 제조, 가동되고 있는 각종 설비에 경제성을 극대화시키면서 동시에 안전을 확보하는 것은 매우 어렵지만 피할 수 없는 당면과제라 생각한다.

참고문헌

- (1) Ewald, J., Meuhle, B., Keinburg, K. and Termuhlen, H., 1985, in Life Assessment and Improvement of Turbogenerator Rotors for Fossil Power Plants, R. Viswanathan, Ed.,

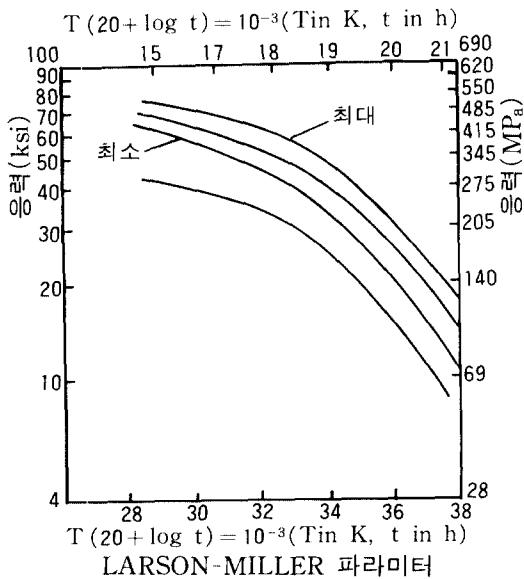


그림 7 로터강의 Larson-Miller 파라미터와 응력관계

- Pergamon Press, New York, pp. 377~398.
- (2) 정순억, 정순호, 장운석, 이현우, 1988, "터빈 로터의 응력해석 및 수명평가," 한국해양공학회지 제2권 1호.
- (3) Viswanathan, R. and Jaffee, R.I., 1983, "Toughness of Cr-Mo-V Steel for Steam Turbine Rotors," ASME J. Engg. Mater. Tech., Vol. 105, pp. 286~294.
- (4) 1987, "Electricity-Today's Technologies, Tomorrow's Alternatives," Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.
- (5) Rolfe, S.T. and Novak, S.R., 1970, "Slow Bend K_{Ic} Testing Medium Strength, High Toughness Steel," STP463, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p. 124.
- (6) Begley, J.A. and Logsdon, W.A., 1971, "Correlation of Fracture Toughness and Charpy Properties of Rotor Steels," Scientific Paper 71-1E7-MSLRF, Westinghouse Research Laboratories, Pittsburgh.
- (7) Paris, P.C. and Erdogan, F., 1963, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws," Trans. ASME, J. Basic Eng., Vol. 85, No. 4, p. 528. 